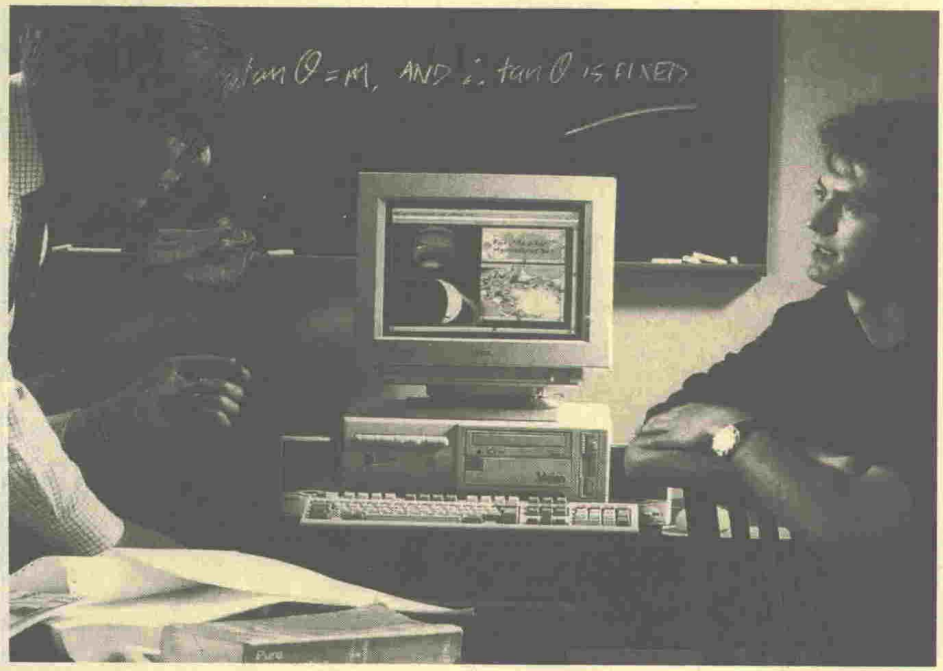
สหัส พรหมสิทธิ์

Self-Reproduction ในโลกของคอมพิวเตอร์



กล่าวถึงงานในด้าน CA ของ John von Neumann ในเรื่องที่เกี่ยวกับ Self-Reproduction

จากบทความเรื่อง "คอมพิวเตอร์กับวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต" ที่ได้ลงพิมพ์ในวารสารไมโครฯ ซึ่งได้มีเนื้อหาส่วนใหญ่ของบทความที่อาศัยหนังสือเรื่อง The Blind Watchmaker ของ ดร.ริชชาร์ด ดอว์กิ้นส์ (Rechard Dawkins) อันเป็นการให้รายละเอียดแก่ผู้อ่านที่หนักไปในเชิงชีววิทยา โดยที่ผู้เขียนยังไม่ได้มีโอกาสที่จะพูดถึงการนำความรู้ในด้านคณิตศาสตร์ รวมทั้งแนวความคิดใหม่ (เช่น cellnlar antomata หรือ CA) มาใช้ในเรื่องของสิ่งมีชีวิตตลอดจนเรื่องอื่นที่เกี่ยวข้องอย่างใกล้ชิด ซึ่งได้มีผู้ค้นคว้ากันมากโดยเฉพาะในต่างประเทศ อันจะเห็นได้จากบทความทางวิชาการที่พิมพ์ในยุโรปและสหรัฐฯ ตลอดจนที่ปรากฏออกมาในรูปของตำราภาษาอังกฤษที่หาซื้อได้ไม่ยาก จึงถือเป็นความรับผิดชอบที่ต้องแจ้งให้ผู้อ่านทราบเป็นการเพิ่มเติมในแง่ของการเล่าสู่กันฟัง ว่า ถ้าจะมองหาตำรารุ่นใหม่ในเรื่องของ artificial life หรือในแง่ของ complexity แล้ว ควรหันไปพึ่งตำราเล่มใด โดยผู้เขียนจะพยายามนำเอกสารอ้างอิงประเภทตำราภาษาอังกฤษมาบอกกล่าวให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งก็คงจะต้องเริ่มจากสิ่งที่ผู้อ่านเคยเรียนรู้จากวารสารด้านคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่ในเมืองไทย (เช่น วารสารไมโครคอมพิวเตอร์) เป็นอันดับแรก ว่าเมื่อไม่กี่ปีมานี้ได้มีการกล่าวถึงเรื่องที่เกี่ยวกับ atrificial life, complexity ฯลฯ ไว้อย่างไรบ้าง โดยจะเริ่มที่ตำราที่เกี่ยวกับการแพร่พันธุ์ที่เรียกว่า Self-Reproduction เป็นอันดับแรก

งานบุกเบิกในด้าน Self-Reproduction

เรื่องราวที่มีผู้เขียนไว้ในวารสารที่เกี่ยวกับคอมพิวเตอร์ในเมืองไทยที่จัดว่ามากพอสมควร สำหรับเมื่อไม่กี่ปีมานี้ ก็จะมีส่วนหนึ่งที่เกี่ยวกับวิทยาการในด้าน AI (Artificial Intelligence) ซึ่งในจำนวนนี้ก็อาจมีเรื่องของชีวิตเทียมหรือ Artificial life รวมอยู่ด้วย จึงไม่ขอกล่าวรายละเอียดซ้ำ แต่จะก้าวไปกล่าวถึงตำราในด้าน Atrificial life (หรือ A-life) รวมทั้งตำราอื่น ๆ ที่จะช่วยชี้ช่องทางในการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการซิมูเลต (simulate) ความเป็นไปของสิ่งมีชีวิตซึ่งคล้ายกับที่ ดร.ดอว์กิ้นส์และนักวิทยาศาสตร์รายอื่น ๆ ได้ทำอยู่ สำหรับในกรณีของ ดร.ดอว์กิ้นส์นั้นได้ใช้ภาษาปาสคาลในการพัฒนาโปรแกรมที่เกี่ยวกับวิวัฒนาการและใช้คอมพิวเตอร์ในระดับพีซี (64 กิโลไบต์)

ก่อนอื่นก็จะต้องขอเกริ่นว่า หนังสือที่เป็น paperback ของ John L. Casti ที่ชื่อว่า Complexification นั้นได้รวมเอาสิ่งที่เป็นวิทยาการใหม่ และส่วนใหญ่ก็จะมีรากฐานบนคณิตศาสตร์ที่คลุมถึงประโยชน์ใช้งานในด้าน

- วิทยาศาสตร์และชีวศาสตร์
- คอมพิวเตอร์ศาสตร์
- เศรษฐกิจการเมืองและสังคม ฯลฯ

ภายในหนังสือที่ชื่อว่า Complexification ของ Casti ได้มีอยู่บทหนึ่งที่มีชื่อเรื่องว่า "THE EMERQENT" ซึ่งมีการอ้างถึงเอกสารในด้าน

CA และ A-life เอาไว้หลายเล่มในตอนท้าย จึงอยากเล่าประวัติสั้น ๆ โดยขอเริ่มจากเรื่องของ Cellular Automata (CA) ว่าได้เกิดจากแนวความคิดของนักคณิตศาสตร์ผู้มีนามว่า Stanislaw Ulam ในปลายทศวรรษ 1940 อันเนื่องจากว่าเขาได้เห็นเพื่อนร่วมยุค (John von Neumann) กำลังเข้าตาจนในขณะที่ทำการค้นคว้าเพื่อแก้ปัญหาในด้าน Self-Reproduction อันเนื่องมาจากความซับซ้อนที่แฝงอยู่ในวิธีการคำนวณที่ von Neumann นำมาใช้ Ulam จึงเข้ามาช่วยแก้ปัญหาโดยอาศัยหลักที่เรียกว่า information-theoretic approach อันเป็นที่มาของเทคนิคที่เรียกว่า CA ตำราที่อยู่ในแวดวงนี้ที่ค่อนข้างใหม่ก็มีเช่น

Artificial Life ซึ่งเขียนโดย Levy, S. (1992) เหมาะสำหรับผู้อ่านทั่วไป ที่หนักไปในทางคำนวณก็มีเช่น Cellular Automata Machines (1987) ซึ่งแต่งโดย Toffoli, T และ N.Margolus กับอีกเล่มซึ่งมีชื่อว่า Lellnlar Automata : Theory and Experiment โดย H.Gutowitz (1991) จากนี้ก็จะก้าวไปสู่ตำราที่ใช้ CA ในด้านชีวภาพ

ได้มีตำราในโลกของ Theoretical Biology อยู่มากพอสมควร ตำราเล่มแรกที่อยากกล่าวถึงก็คือ การใช้ CA ในชีววิทยาภาษาและเศรษฐศาสตร์ ซึ่งก็มีเช่น ที่แต่งโดย Casti, J. โดยมีชื่อว่า Reality Rules: Picturing the World in Mathematics (2 Vlos), I-The Fundamentals (1992) รวมทั้งหนังสือที่สำคัญอีกเล่มที่แต่งโดย Stephen Wolfram (1985) ที่ชื่อว่า Theory and Applications of Cellular Automata และหนังสือที่เขียนโดยนักวิทยาศาสตร์ที่ชื่อว่า Aristid Lindenmayer คือในปลายทศวรรษที่ 1960 ก็ได้มีนักชีววิทยาชาวดัทช์ที่ชื่อว่า Lindenmayer ได้เสนอ CA โมเดลสำหรับการเจริญเติบโตของพืชประเภท filamentous เช่น พวก algac ที่มีสีเขียวแกมน้ำเงินและมีชื่อทางพฤกษ์ศาสตร์ว่า Anabacna โมเดลของนักชีววิทยาผู้นี้ที่ถือว่ามีสิ่งแปลกใหม่ก็คือว่าการเติบโตของเซลล์ต่าง ๆ ของ Anabaena จะเป็นไปตามตำหรับ (recipe) ที่กำหนดไว้โดย state-transition rule อันเป็นการเติบโตที่สามารถเรียนแบบจาก filamentous plant ได้อยู่เหมือนจริงโดยอาศัยรูปแบบของการจำลองทำเทียมที่เรียกว่า L-systems ของ Lindenmayer ตำราที่นักปราชญ์ผู้นี้ได้เขียนร่วมกับนักวิทยาศาสตร์อีกท่านนี้เป็นผู้ร่วมงานก็คือ Prusinkiewicz, P. and A.Lindenmayer. "The Algorithmic Beauty of Plants" (1990)

จากนี้ผู้เขียนก็อยากจะเพิ่มสาระให้แก่บทความด้วยการขอพักครึ่งเวลาในเรื่องของการแนะนำตำรา เพื่อหันไปพูดถึงเนื้อหาทางวิชาการเพื่อเป็นการแถมว่า สิ่งที่เป็น L-systems ที่พูดในข้างต้นนี้คืออะไร อันจะทำให้ผู้อ่านรู้จักผลงานของ Lindenmayer เพราะเห็นว่าคงยังไม่มีการเขียนเรื่องนี้ลงในวารสารไมโครฯ ต่อจากนั้นก็จะพูดถึงงานในด้าน CA ของ John von Neumann ในเรื่องที่เกี่ยวกับ Self-Reproduction เป็นการส่งท้าย

CA กับการเติบโตของสิ่งมีชีวิต

ระบบมีชีวิตของ Lindenmayer ที่ง่ายที่สุด ซึ่งจะนำมาแสดงในที่นี้ได้แปลมาจากหนังสือเรื่อง Cousplexification ที่แต่งโดย John L.Casti และพิมพ์ในปี 1994 L-systems ที่ง่ายที่สุดนี้จะอยู่ในรูปของ grid ที่มีมิติเดียว และจะเริ่มการเติบโตเมื่อเวลา t = 0 ด้วยเซลล์ที่มีชีวิตเพียงเซลล์เดียวและจะมีค่าเท่ากับ 1 state-transition rule ในกรณีนี้จะมีว่า "ค่าตัวเลขอันต่อไปที่เซลล์ I จะเป็นค่าในปัจจุบันพร้อมด้วยค่าตัวเลข (value) ของเซลล์ที่อยู่ทางซ้าย (นั่นก็คือ เซลล์ที่ 2-1)" ดังนั้นสมการทั้งหมดของ state transition ของเซลล์ 2 จะเป็นดังนี้

```
(2=0, 2-1=0) > 2=0 (2=0, 2-1=1) > 2=1
(2=1, 2-1=0) > 2=11 (2=1, 2-1=1) > 2=0
```

โดยผู้แต่งหนังสือเรื่อง Complexification (หน้า 219 - 221) ได้อธิบายต่อไปว่า สิ่งที่น่าสนใจสำหรับกฎข้างต้นก็คือ ความเป็นไปได้ของการแบ่งเซลล์ที่จะเกิดขึ้นเมื่อ 2=1, 2-1=0 คือ ถ้ามีการเลือกสถานะขั้นต้นให้เซลล์ตัวแรกทางซ้ายมีค่าเท่ากับ 0 และให้เซลล์ถัดไปมีค่าเป็น 1 ก็จะได้ state transitions ที่เป็น 4 อันดับแรก ดังนี้

```
01, 011, 0110, 011011
```

ซึ่งแสดงการเติบโตของ initial "seed" เซลล์ที่ 2 ที่เพิ่มเป็นหลาย ๆ seeds ในเซลล์ที่ 2, 3, 5 และ 6 แถวของตัวเลขที่ประกอบด้วย 0 และ 1 ในขั้นนี้จึงยังไม่มีความหมายที่เข้าไปเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิต เช่น พืชแต่อย่างใด อันทำให้จำเป็นต้องเพิ่มสัญลักษณ์ขึ้นมาอีกสองตัวคือ "[" และ "]", ดังนั้น state-transition rule ที่มีสัญลักษณ์อยู่สี่ตัวก็จะมี transformation rules ดังนี้

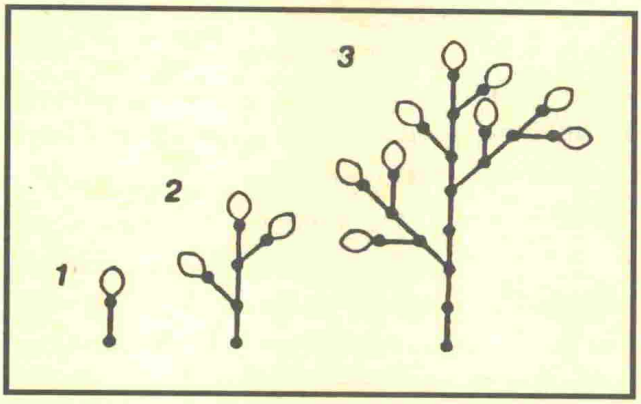
```
0 > 1[0]1[0]0
1 > 11
[ > [
] > ]
```

การทดลองเพื่อดูว่ากฎในข้างต้นทำงานอย่างไรนั้น ก็สามารถชักตัวอย่างด้วยการสร้างแถวของตัวเลขที่เริ่มต้นด้วยสัญลักษณ์ที่เป็น 0 แล้วนำ transformation rules (4 ข้อ) มาใช้ก็จะเกิดเป็น CA สำหรับขั้นที่หนึ่ง สอง และสาม ดังนี้

```
t=0 : 0
t=1 : 1[0]1[0]0
t=2 : 11[1[0]1[0]0]11[1[0]1[0]0]1[0]1[0]0
```

แถวตัวเลขข้างต้นก็ยังดูไม่น่าจะเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตเช่นต้นไม้แต่อย่างใด จึงต้องหาวิธีแปลความหมายของสัญลักษณ์ทั้งสี่ตัวให้เป็นโครงสร้างที่เหมือนต้นไม้ โดยให้เลข 0 และ 1 แทนส่วนที่เป็นกิ่งก้าน (line segments) และให้วงเล็บ [และ] แทนจุดที่เกิดการแตกกิ่ง (branch points)

ขั้นต่อไปในการก้าวไปสู่รูปของต้นไม้ก็คือ การกำหนดให้ส่วนที่เป็น 1-segments ว่างอยู่เฉย ๆ และให้มีใบไม้หนึ่งใบอยู่ตรงปลายของแต่ละ 0-segment เช่นในกรณีของแถวตัวเลข 1[0]1[0]0 กิ่งหรือก้านก็จะเป็นสัญลักษณ์ที่ไม่ได้อยู่ในวงเล็บ คือจะประกอบด้วย 1-segment อันหนึ่งที่อยู่ใต้ 1-segment อีกอันหนึ่งและมี 0-segment อยู่ตรงยอด (ดูรูปที่ 1) จากนี้ก็จะมีจุดที่จะแตกกิ่งอยู่สองแห่ง แต่ละแห่งก็จะมีหนึ่ง 0-segment ที่แตกออกจากแนวเส้นตรงโดยกิ่งแรกจะแตกออกจาก segment แรก และกิ่งที่สองจะแตกออกจากท้ายของ segment ที่สอง (ดูรูปหมายเลข 2 ในรูปที่ 1) ส่วนในเรื่องทิศทางของกิ่งที่แตกออกไปจากลำต้นนั้นก็มีวิธีกำหนดที่ง่ายที่สุด นั่นก็คือการให้แตกออกไปทางซ้ายและขาในรูปที่สลับกัน ดังในรูปที่ 1 ซึ่งแสดงการเติบโตของต้นไม้ในสาม generations แรกคือเมื่อ t=0, 1 และ 2 โดยให้เป็นไปตาม L-systems grammaar ที่กำหนดไว้ในข้างต้นพร้อมด้วยกฎที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัญลักษณ์ทั้ง 4 ตัว กับกิ่งและใบที่ได้กล่าวไว้แล้ว ทั้งหมดนี้เป็นการแสดงว่า L-systems สามารถสะท้อนความเป็นไปในการพัฒนาเติบโตของพืช เช่น ต้นไม้ อันน่าเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องมือในด้าน computer science ที่ ดร.ดอว์กิ้นส์ ใช้ในการสร้างคอมพิวเตอร์โมเดลในเรื่องของวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต แล้วนำผลของการทดลองมาพิมพ์เป็นหนังสือที่ชื่อว่า The Blind Watchmaker จากนี้ก็จะก้าวต่อไปพูดถึง ส่วนหนึ่งของงานค้นคว้าของอัจฉริยะบุรุษ เช่น John von Neumann ซึ่งเป็นทั้งปรมาจารย์ด้านคอมพิวเตอร์ศาสตร์กับการเป็นบิดาในด้านอื่น เช่น การสร้างระเบิดปรมาณู ฯลฯ ในช่วงก่อนสงครามโลกครั้งที่สองจึงเป็นระยะเวลาที่มีนักวิทยาศาสตร์และนักคำนวณที่โลกยอมรับเกิดขึ้นนับเป็นสิบ ทั้งในสหรัฐฯและยุโรป (เช่น von Neumann, Stanislaw Ulam, Einstein, Oppenheimer, Enrico Fermi ฯลฯ)



รูปที่ 1
แสดงสาม generations แรกของ L-system ของต้นไม้ที่อาศัยแนวความคิดจาก cellular antomata ในรูปของ L-systems เช่นที่ Lindenwayer ได้สร้างขึ้นมา

von Neumann กับ Self-reproduction

ในการบรรยายที่ Caltech ในปี 1948 John von Neumann ได้อาศัยแนวความคิดจาก Cellular Automata (CA) เพื่อเป็นเครื่องกำหนดเงื่อนไขสำหรับสิ่งที่ต้องการแพร่พันธุ์ตัวเอง (Self-Reproduction) ว่าจะต้องมีคุณสมบัติเช่นใด สิ่งที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับความนึกคิดของ von Neumann ในกรณีนี้จึงเป็นเรื่องขององค์กรทางตรรก (logical organization) กับกิจกรรมอันเป็นหน้าที่ (functional activities) ซึ่งเป็นสิ่งเรียกว่า object จำต้องมีเพื่อที่จะได้สามารถสร้างทายาท (copy) ของสิ่งนั้นได้ จุดมุ่งหมายในเรื่องนี้ก็คือว่า von Neumann ต้องการที่จะสร้างสิ่งที่เป็นนามธรรมสำหรับกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับ Self-Reproduction ในธรรมชาติ ในรูปที่เป็น logical form สำหรับการแพร่พันธุ์ (reproduction process) โดยไม่ผูกพันกับโครงสร้างทางวัตถุว่าต้องเป็นอะไร

การแก้ปัญหาข้างต้นได้มีผลให้ von Neumann สร้าง universal Turing machine ที่เป็นแบบ Z-D CA (หรือ CA ที่เป็นสองมิติ) ซึ่งแต่ละเซลล์ภายใน CA จะมีอยู่ 29 states ด้วยกัน ความคิดในเรื่องนี้ก็จะเป็นว่าจะมีการจำลองสิ่งที่เป็น initial machine ให้เป็นแพตเทอร์นอันหนึ่งในแผง CA โดยได้กำหนดว่า Self-Reproduction จะเกิดขึ้นเมื่อสามารถที่จะหากฎของ state transition ที่จะก่อให้เกิดสำเนาของ initial pattern ขึ้นได้ในแผงของ CA และในการที่ให้ได้มาซึ่ง Self-Reproduction ที่เป็นของแท้นั้นคำสั่งต่าง ๆ (instructions) ที่ใช้ในการสร้างสำเนา (copy) จะต้องมีอยู่ใน initial configuration อันเป็นรูปแบบที่มีอยู่ในตอนต้น

von Neumann ได้แสดงว่า CA ที่มี 29 states ที่เขาสร้างขึ้นมานั้นสามารถที่จะเป็นงานสร้างที่เรียกว่า universal construction โดยมีสิ่งที่เรียกว่า Self-Reproduction ซึ่งเป็นแค่เพียงกรณีพิเศษเมื่อแมชีนที่เป็นอินพุตของ constructor ก็คือ ตัว constructor เอง กุญแจในการนำไปสู่การแก้ปัญหาในเรื่อง Self-Reproduction จะเป็นไปในแง่ของการขบประเด็นในเรื่องของการทำสำเนาของพิมพ์เขียว (blueprint) ของแมชีน โดยสมมติว่าเราสามารถสร้าง universal constructor อันหนึ่งได้สำเร็จ จากนั้นก็ป้อนแพน (plans) สำหรับ constructor เข้าไปในตัวของมันในรูปของอินพุต constructor ก็จะแพร่พันธุ์ตัวของมันเองได้ แต่จะไม่ reproduce สิ่งที่เป็นคำสั่ง (instructions) ที่บอกวิธีที่จะสร้างตัวของมันเองขึ้นมา อันเป็นข้อคิดที่ยากแก่การเข้าใจเพราะขัดกับความรู้สึกโดยทั่วไปในเรื่องของ Self-Reproducing machine ในแง่ที่ว่าเราจะจัดการอย่างไรเพื่อให้

blueprint และ constructor สามารถแพร่พันธุ์ตัวของมันเองได้อย่างเหมือนของจริงอันเป็นปัญหาโลกแตกสำหรับ von Neumann ซึ่งในที่สุดปราชญ์เอกผู้นี้ก็ได้แก้ปัญหาในรูปของการใช้ข้อมูล (information) บนพิมพ์เขียว โดยแบ่งออกเป็นสองลักษณะที่แตกต่างออกไปคนละทาง

การแก้ปัญหาแบบงูกินหางในเรื่องพิมพ์เขียว (blueprint dilemma) ของ von Neumann ก็คือการสร้างสิ่งที่เป็น "supervisory unit" เข้าไปใน constructor โดยที่การทำงานของ unit เช่นนี้จะมีสองขั้นคือ

- ในขั้นแรกจะมีการใส่พิมพ์เขียวเข้าไปใน constructor เหมือนอย่างที่เคยทำและ constructor จะแพร่พันธุ์ตัวของมันเอง จากนี้ supervisory unit ก็จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนสถานะ (state) จาก construction-mode เป็น copy-mode แล้วทำการคัดลอกสิ่งที่เป็นพิมพ์เขียวให้เป็นไปในรูปของข้อมูลดิบที่ยังไม่ได้พิเคราะห์ตีความ (raw,unin-terpreted data)

- สิ่งที่คัดลอก (copy) ในขั้นต้นจะถูกผนวกเข้าไปใน constructor ที่ผลิตขึ้นเมื่อครั้งก่อนซึ่งจะมี supervisory unit อยู่ในตัวและวัฏจักรของ Self-Reproducing ก็จะสิ้นสุดตรงนี้

การแก้ปัญหาโดยอาศัยหลักในข้างต้นเป็นการหาวิธีที่จะไม่พูดว่า constructor เป็นส่วนหนึ่งของตัวมันเอง ด้วยการกำหนดให้พิมพ์เขียวอยู่ภายนอกแมชีนและเข้าไปในส่วนหนึ่งของแมชีน ในตอนท้ายของ construction phase โดยการกำหนดหน้าที่ของการคัดสำเนาของ supervisory unit

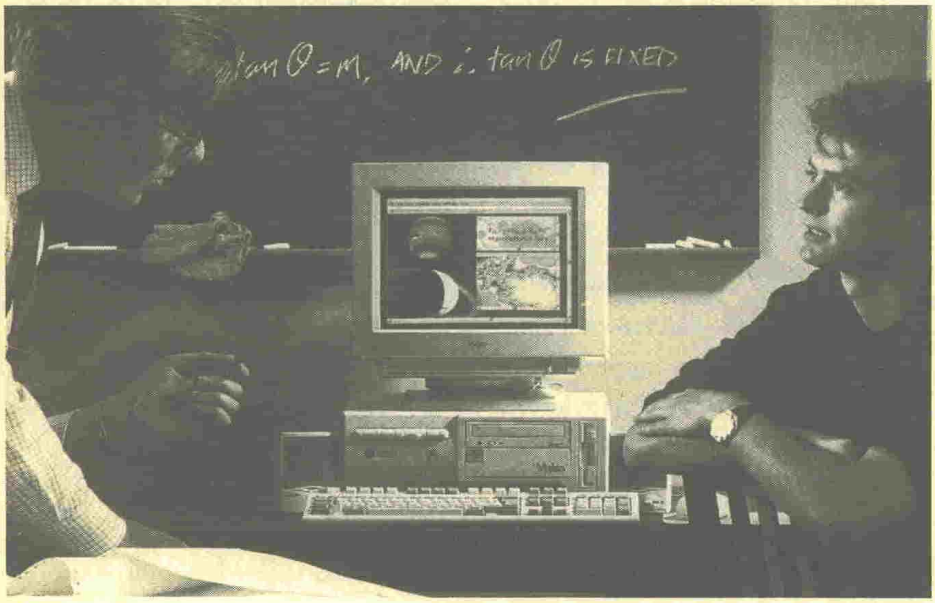
สิ่งสำคัญที่ต้องให้การสังเกตในการแก้ปัญหาของ von Neumann ก็คือวิธีการที่ข้อมูล (information) บนอินพุตที่เป็นพิมพ์เขียวได้ถูกนำไปใช้ในสองทางที่มีความแตกต่างกันในขั้นพื้นฐานนั่นก็คือ

ประการแรก ข้อมูลบน input blueprint จะได้รับการแปลงให้เป็นคำสั่งชุดหนึ่งที่ต้องการตีความ ซึ่งเมื่อได้มีการ execute แล้วคำสั่งดังกล่าวก็จะก่อให้เกิดการสร้างแมชีนขึ้นมาในที่ใดที่หนึ่งภายในแผง CA

ประการที่สอง หลังจากนั้นข้อมูล (information) ก็จะถูกทำให้อยู่ในสภาพที่ยังไม่ได้ถูกตีความซึ่งจะต้องได้รับการคัดลอกแล้วผนวกเข้าไปในแมชีนตัวใหม่

สรุป

ความน่าตื่นเต้นอันเป็นผลจากค้นคว้าของ von Neumann ในเรื่อง Self-Rreproduction ที่อาศัยแนวความคิดจาก Cellular Automata นั้น เป็นความบังเอิญว่าได้มีอยู่ในธรรมชาติมานานแล้ว แต่ยังไม่มีนักคิดคนใดที่สามารถหยั่งรู้จนได้มีการพบว่า อรรถาธิบายของนักปราชญ์ผู้นี้ได้มีอยู่ใน Self-Reproduction ในทางชีววิทยาในแง่ที่ว่า

interpreted instructions จะเหมือนกับกระบวนการทางพันธุกรรมที่เรียกว่า translation ส่วนการสร้างสำเนาแบบที่เรียกว่า blind copying สำหรับข้อมูลที่ยังไม่ได้รับการตีความ (uninterpreted data) นั้นก็จะเหมือนกับกระบวนการทางพันธุกรรมที่เรียกว่า replication อันเป็นกระบวนการที่มีอยู่ในการทำงานของทุกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่น่าสังเกตก็คือว่า von Neumann ได้เป็นผู้พบความจำเป็นในอันที่จะต้องใช้ข้อมูลที่มีนัยที่แตกต่างกันเป็นสองทางนับเป็นเวลาหลายปีก่อนหน้า ที่จะมีนักชีววิทยามาค้นพบความจริงเช่นนี้ในการค้นคว้าเพื่อคลี่คลายความเร้นลับของ DNA ข้อแตกต่างระหว่างการตั้งสมมติฐานของ von Neumann กับความเป็นไปในธรรมชาติก็คือว่า von Neumann เลือกที่จะให้เกิดมีกระบวนการในการคัดลอกขึ้นหลังจาก construction phase ส่วนกระบวนการทางธรรมชาติจะเป็นการคัดลอก DNA ในตอนต้น ๆ ของการแพร่พันธุ์ของเซลล์ (cellular reproduction) จึงจะขอยุติเรื่องราวของ von Neumann แต่เพียงนี้

สำหรับผู้ที่อยากจะหาความรู้เพิ่มเติมก็อาจค้นคว้าจากตำราเช่นที่แต่งโดย von Neumann ซึ่งมีชื่อว่า "Theory of Self-Reproducing Automata" ซึ่งพิมพ์ในปี 1966 หรือหาตำราที่ง่ายกว่านี้อ่าน ซึ่งก็มี Essays on Cellular Automata ที่มี A.Burks เป็นผู้รวบรวมและพิมพ์ในปี 1970 หนังสืออื่นที่เกี่ยวแก่ Self-Reproducing life patterns ที่จะแนะเป็นการส่งท้ายก็มีเช่น The Recursive Universe ซึ่งเขียนโดย Poundstone, W. (1985) และตำราของ Rietman, E. ซึ่งมีชื่อว่า Geating Artificial Life ซึ่งพิมพ์ในปี 1993